doi:10.13866/j.azr.2018.06.15

1960—2017年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化①

崔凤琪[1,2]， 唐海萍[1,2]， 张 钦[1,2]， 戴路炜[1,2]

（1. 北京师范大学地理科学学部资源学院，北京 100875；
2. 北京师范大学，地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875）

摘 要：基于1960—2017年呼伦贝尔草原6个气象站点的逐日气象数据，计算与区域水旱寒热密切相关的13个表征气候变化的指数，利用线性拟合法、Mann-Kendall检验、Sen's斜率估计和小波分析等方法，分析呼伦贝尔草原极端气候事件的发生趋势与时空格局。结果表明：① 表征极端高温指数的夏日日数、暖夜日数、暖昼日数、暖持续日数分别以3.53 d·(10a)$^{-1}$、4.09 d·(10a)$^{-1}$、3.1 d·(10a)$^{-1}$、2.67 d·(10a)$^{-1}$的速率显著上升($P<0.01$)；而表征极端低温事件的指数霜日日数、冷夜日数分别以3.22 d·(10a)$^{-1}$、2.9 d·(10a)$^{-1}$的速率显著下降($P<0.05$)。② 极端气温的突变开始于20世纪90年代，变暖速率最快的区域位于研究区的东北部，在近58 a的时间尺度上各项极端气温指数显著周期集中于2～9 a。③ 研究区内5 d最大降水量、持续湿润指数分别以5 mm·(10a)$^{-1}$、0.2 d·(10a)$^{-1}$的速率呈现出显著下降趋势($P<0.01$)，持续干燥指数呈现微弱上升，年总降水量和降水强度呈现下降趋势，但并不显著。④ 表征极端降水事件的指数(普通日降水强度、年湿期降水总量、干燥指数、5 d最大降水量)在南北方向上以研究区的中轴线为界，东部地区干燥指数下降，年总降水量显著上升，具有变湿的趋势；西部地区持续干燥指数增加，持续湿润指数显著减少，呈现出变干的趋势。降雨指数突变点分布并未发现统一规律，显著周期集中于2～7 a。

关键词：极端气温；极端降水；时空变化；M-K检验；小波分析；呼伦贝尔草原

气候变化已经成为影响人类社会可持续发展的重大问题之一。IPCC第五次评估报告指出，1880—2012年，全球地表的平均温度上升了0.85 ℃，且升温速率加快，气候变化已经对人类健康和安全造成了负面影响[1-2]。在全球气候变暖背景下，极端气候事件由于突发性强会给水资源供给、生态系统安全、灾害预测等方面带来潜在影响，对当地农业、生态环境等敏感领域的影响尤为显著[3-4]。

目前，极端气候事件的空间格局及变化已经引起了国内外学者的广泛关注[5]。Song等[6]对1981—2010年世界各国的极端温度事件进行分析，发现全球热浪和寒流事件发生频率分别增加了2.7倍和6.4倍；任国玉等[7]研究发现，从全国范围看与异常偏冷相关的极端事件显著减少减弱，偏冷的气候极值减轻，异常偏暖的相关指数明显增多，全国平均暴雨和极端强降水事件频率及强度有所增加，但是华北、东北中南部和西南部分地区减少减弱；郑景云等[8]对中国过去2000年极端气候事件变化分析，得到在1500—1900年和220—580年等气候寒冷期，中国曾经出现过多次较显著的冷冬事件和炎热的夏季；任景全等[9]对1961—2015年吉林省极端高温进行研究，发现极端高温和极端低温均呈自西向东逐渐升高的空间分布特征，夏季日数、热夜日数和冷持续日数自西向东逐渐降低，冰冻日数由南向北逐渐增加；游庆龙等[10]对雅鲁藏布江流域极端气候事件进行研究发现，夜间和白天极端低温日数显著减少，夜间极端高温日数和白天极端高温日数显著增加；高妍等[11]对祁连山讨赖河流域分析得出，极端降水指数增大趋势明显，降水量的增加主要是单次降水时间持续加长和中雨日数增加的贡献，高海拔区极端降水事件发生的频次增多；吕婷等[12]对吐鲁番市极端气温变化规律研究发现，极端最高气温和极端最低气温都呈上升趋势，后者比前者的上升幅度更大。以上研究多集中于全球、全国、省市、流域等大尺度多站点地区或者对于单一站点的研究，但是对景观尺度上的极端气候变化规律的研究还较

① 收稿日期：2018-04-24； 修订日期：2018-06-14
基金项目：国家重点研发计划(2016YFC0500608-3)
作者简介：崔凤琪(1993-)，女，硕士生，研究方向为气候变化与生态系统服务. E-mail：zhcuifengqi@163.com
通讯作者：唐海萍. E-mail：tanghp@bnu.edu.cn

为缺乏。

近些年,由于气候变化、气候异常和超载过牧现象的存在,导致内蒙古草原退化严重,严重威胁呼伦贝尔草原生态系统,使得该地区已然成为全球气候变化过程中的生态敏感区和脆弱区[13]。本文利用线性趋势法、Mann-Kendall 检验、Sen's 斜率估计和小波分析等方法,揭示了 1960—2017 年呼伦贝尔草原极端气候事件的长期变化趋势及空间分异规律,可为研究小尺度区域极端气候时空变化及发展适应性的灾害性气候变化与生态恢复等战略措施提供科学依据。

1 研究区概况

呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西南部,地处大兴安岭以西,地理位置 47°20′~50°15′N,115°30′~121°10′E,是我国主要的畜牧业生产基地,呼伦贝尔草原面积 8.33×10^6 hm^2,主体区域包括新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、陈巴尔虎旗、鄂温克旗和海拉尔区、满洲里市(图 1)。平均海拔 714.4 m,地形总体上呈东高西低,东部为大兴安岭林地与草原的交错带,中部以草甸草原为主并向西逐步过渡为典型草原。呼伦贝尔草原属温带大陆

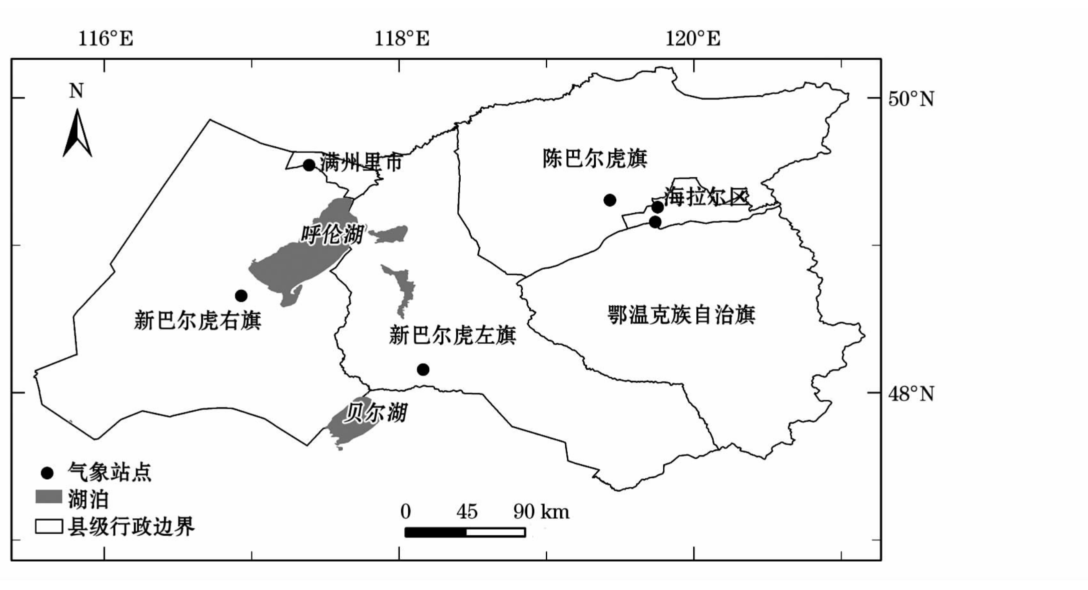


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the study area

性季风气候,是属于半干旱区域,随季节变化会引起大范围的盛行风,其气候类型的鲜明特点即为春夏季时短凉爽,秋冬季寒冷多风而时长。

2 研究方法及数据来源

2.1 数据来源与处理

呼伦贝尔 6 个气象站 1960—2017 年逐日最高气温、最低气温、降水均来自国家气象信息中心(http://data.cma.cn)。所选取的 6 个气象站点的气温和降水数据均通过了标准正态一致性检验,对异常值和错误值进行剔除后,基于 Matlab2015b 软件对气温和降水数据进行计算。

2.2 研究方法

2.2.1 *极端气候指数* 气候变暖使我国大部分地区的植被活动呈增强趋势[14],已有研究表明,呼伦贝尔草原 NDVI 与气温具有良好的正相关关系[15],并且呼伦贝尔草原气温升高、降水量减少和干旱频发是导致草原退化面积迅速增加的主要原因[16]。本研究以目前已经被广泛应用[9,12,17],由气候变化检测、监测和指数专家组 ETCDI(Expect Team on Climate Change Detection and Indices)定义的核心指数[18]为基础,同时结合呼伦贝尔地处中国北方温带地区、气候灾害胁迫以寒冻与干旱为主的特点,选取了霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数等 8 个表征极端气温的指数,以及年总降水量、降水强度、5 d 最大降水量等 5 个表征极端降水的指数(表 1)。极端气候指数的计算过程在 Matlab2015b 中通过编程计算统计得到。

2.2.2 *变化趋势及周期计算方法* 非参数检验(Mann-Kendall)不针对特定的参数,而是模糊地对变量分布的中心位置或分布状态做检验(式1、

表 1 极端气候指数的定义

Tab. 1 Definitions of extreme climate indices

类别	指标名称	定义	单位
气温指数	霜冻日数(FD0)	日最低气温小于0 ℃的日数	d
	冷夜日数(TN10p)	日最低气温小于10%分位值的日数	d
	冷昼日数(TX10p)	日最高气温小于10%分位值的日数	d
	冷日持续指数(CSDI)	每年至少连续6 d最低气温小于10%分位值的日数	d
	暖夜日数(TN90p)	日最低气温大于90%分位值的日数	d
	暖昼日数(TX90p)	日最高气温大于90%分位值的日数	d
	夏日日数(SU25)	日最高气温大于25 ℃的日数	d
	暖持续指数(WSDI)	每年至少连续6 d最低气温小于10%分位值的日数	d
降水指数	年总降水量(PRCPTOT)	年内日降水量≥1 mm的降水量总量	mm
	降水强度(SDII)	年总降水量与降水日数比值	mm·d^{-1}
	5 d最大降水量(RX5D)	每月连续5 d最大降水量	mm
	持续干燥指数(CDD)	日降水量<1 mm的最长连续日数	d
	持续湿润指数(CWD)	日降水量≥1 mm的最大持续日数	d

式2),不对总体分布做严格假定,因而适用性较强。本研究采用线性趋势模拟、Mann-Kendall趋势检验、突变点检验对研究区近58 a变化趋势以及突变发生的起始位置进行检验。

$$Z_c = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S<0 \end{cases} \tag{1}$$

衡量趋势大小的指标为:

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i-j}\right) \tag{2}$$

式中:$1<j<i<n$,β所代表的是斜率,正的则是上升,负的代表下降,值的大小代表趋势明显与否。

小波功率谱图和全域能量图反映了波动能量随尺度的分布情况,其用来确定一个时间序列中存在的周期变化[19]。本研究中将所有气象数据去趋势后,利用小波分析的方法分析各个指标的重现周期。最后在空间特征分析中,使用ArcGIS对极端气候指标值和Sen's指数进行反距离权重空间差值。

3 结果与分析

3.1 极端气温时空变化特征

3.1.1 极端气温指数年际变化 从图2可以看出,夏日日数(SU25)、暖夜日数(TN90P)、暖昼日数(TX90P)、暖持续指数(WSDI)分别以3.53 d·(10a)$^{-1}$、4.09 d·(10a)$^{-1}$、3.1 d·(10a)$^{-1}$、2.67 d·(10a)$^{-1}$的速率显著上升($P<0.01$);而表征极端低温事件的指数霜日日数(FD0)、冷夜日数(TN10P)分别以均3.22 d·(10a)$^{-1}$,2.9 d·(10a)$^{-1}$的速率下降,且均通过了0.05的显著水平检验。冷昼日数(TX10P)、冷持续指数(CSDI)虽呈现下降趋势,但并不显著。区域白天增温速度明显高于夜晚。总体而言,呼伦贝尔草原气候变暖特征显著,是对全球气候变暖正响应的地区。

对1960—2017年表征极端气温的指数进行M-K趋势检验和突变点检验(表2),M-K检验结果与线性分析结果基本一致,TX90P、SU25、TN90P、WSDI均通过了0.01的显著性检验,呈显著增加趋

表 2 呼伦贝尔草原极端气候指数的M-K检验、突变年份及小波分析结果

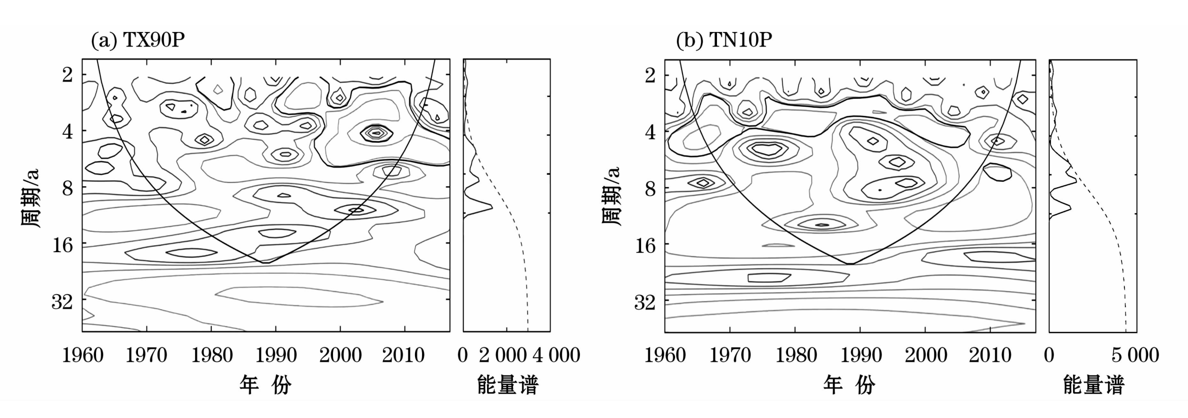
Tab. 2 The results of Mann-Kendall test, mutation years of extreme climatic indices and wavelet analysis

指标	MK-Z值	Sen's 斜率/(10a)$^{-1}$	趋势	突变年份	小波显著周期/a
TX90P	3.33**	3.51	上升	1998	2~4,6
SU25	3.62**	3.42	上升	1996	3,6
TX10P	-0.54	-0.90	下降	1975,2009	2,4
WSDI	2.72**	2.33	上升	2009	3
TN90P	5.37**	3.95	上升	1993	2~4
FD0	-5.63**	-3.14	下降	1986	7,9
TN10P	-2.39*	-3.06	下降	1974	2~4,7
CSDI	-1.04	-0.82	下降	1973	3
SDII	-0.27	-0.05	下降	1999,2003	2
PRCPTOT	-0.03	0.22	上升	1970,2005	7
CDD	-0.71	0.64	上升	-	4
CWD	-3.49**	-0.25	下降	1964	2~3
RX5D	-4.36**	-5.32	下降	-	4

注:**为$P<0.01$显著水平检验,*为$P<0.05$显著水平检验。

图 2　1960—2017 年呼伦贝尔草原极端气温指数的年际变化

Fig. 2　Annual variation of extreme climate indices in the Hulunbuir Grasslands during the period of 1960 – 2017



注:黑实线圆弧表示头部影响的临界线,黑曲线内的区域表示通过了 0.05 显著性水平的检验,能量谱中实线为能量谱,超过虚线的部分通过了 0.05 显著性水平的检验。

图 3　暖昼日数(TX90P)与冷夜日数(TN10P)小波功率谱及小波全域能量谱

Fig. 3　Continuous Morlet wavelet power and the global wavelet power spectra of TX90P and TN10P

势;而表征低温的 FD0、TN10P 呈现显著下降趋势;TX10P 与 CSDI 变化趋势不明显。由 M-K 突变点分析结果可知,表征高温的指数(TX90P、SU25、TN90P、WSDI)的突变年份集中在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初,表征低温指数(FD0、TN10P、TX10P、CSDI)的突变年份集中在 20 世纪 70 年代和 80 年代,表明研究区内首先进入的是低温指数的突变,随后进行的是高温的突变。

3.1.2　极端气温的周期变化　利用 Morlet 小波分析方法(http://paos. colorado. edu/research/wavelets),对 1960—2017 年呼伦贝尔草原区极端气温的周期进行分析。从暖昼日数和冷夜日数的小波分析及小波全域能量谱(图 3)来看,二者均存在 2 ~ 4 a 振荡周期,除此之外,暖昼日数还存在 6 a 的显著周期,冷夜日数也存在 7 a 的显著周期。从周期出现的时间来看,TX90P 在 20 世纪 90 年代前出现了 2 ~ 4 a 和 16 a 的周期,90 年代后出现了 2 ~ 8 a 震荡周期以及 12 a 和 16 a 的周期;而 TN10P 在 20 世纪 90 年代前出现了 3 ~ 4 a、6 a、16 a 的周期,90 年代后出现了 6 a、8 a 的周期。其余指数周期参见表 2。

3.1.3　极端气温空间变化　结合 M-K 检验和 Sen's 斜率空间差值结果(图 4)可知,呼伦贝尔草原极端高温指标暖昼日数(TX90P)、高温日数(SU25)、暖夜指数(TN90P)呈现持续增加趋势,且研究区全部通过 0.05 显著性检验。其中 TX90P、SU25 指数增加幅度较高的地区集中分布于研究区的东北部,整个研究区的暖持续指数、暖夜指数也呈现出上升趋势,上升最为明显的区域位于东北部,并且随着距东北部距离的增加,暖夜增加幅度逐渐减小;冷昼日数在空间上呈现不均衡性,从西南方向至东北方向上由减少变为增多。霜冻日数、冷夜指数全区域呈现下降趋势,下降显著的区域[> -2.9 d·(10a)$^{-1}$]位于研究区的西部;冷持续指数在空间

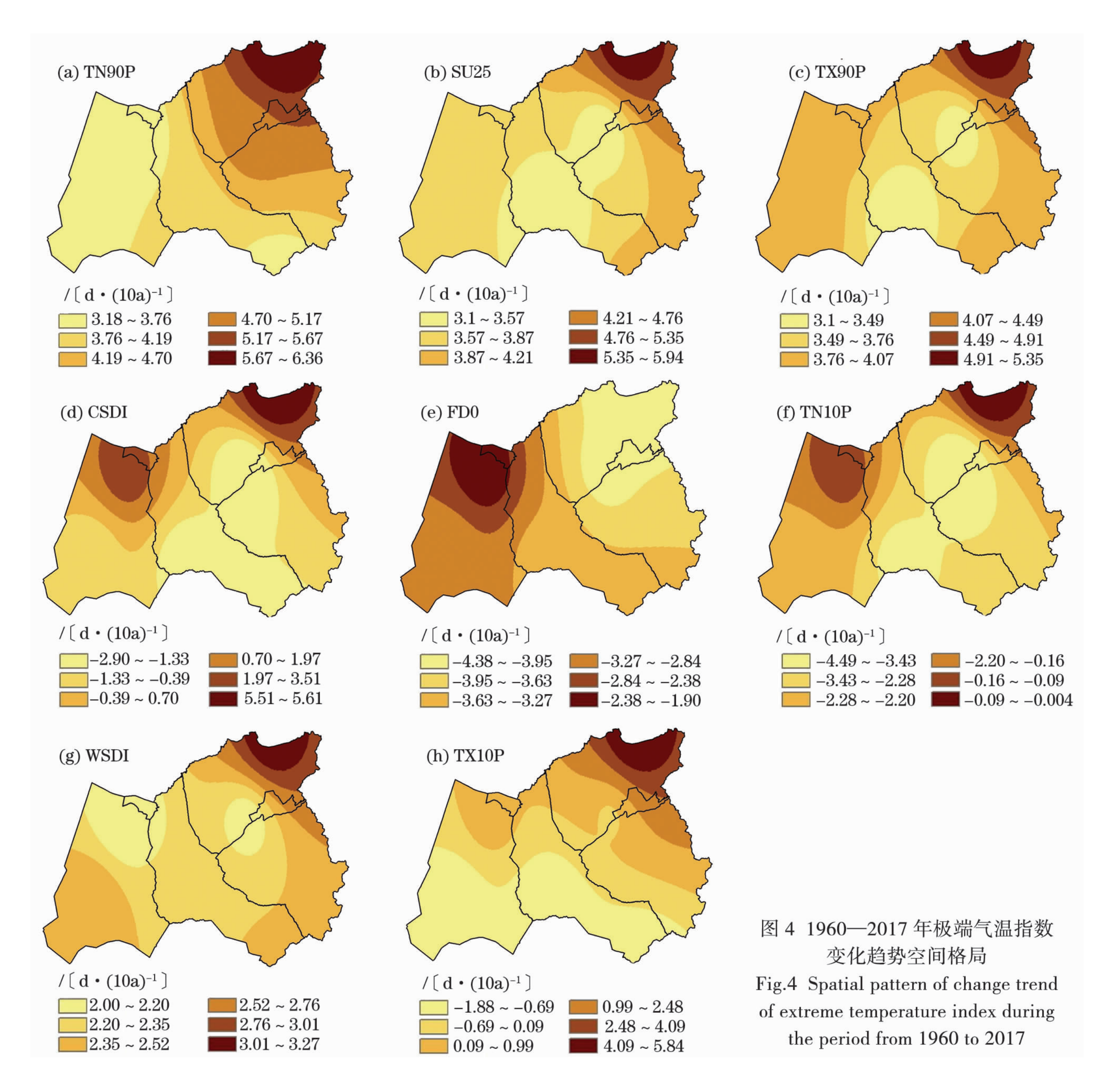


图 4　1960—2017 年极端气温指数变化趋势空间格局

Fig.4　Spatial pattern of change trend of extreme temperature index during the period from 1960 to 2017

上表现出一定的差异性,大部分区域呈现显著的减小趋势〔< -0.647 d·(10a)$^{-1}$〕东北部和西北部呈现出拱形的增加趋势。总的来说,研究区内整体呈现增温趋势,东北部区域 SU25、TX90P 增温最为明显,而 TN10P 缓慢减小,CSDI 有所增加,说明该地区有温差增大的趋势;研究区的东部和中部地区暖昼指数有所增加,冷持续指数和冷夜指数下降,呈现增温的趋势;西部区域冷夜指数下降,暖夜指数增加,冷持续指数增加,说明该地区呈现增温趋势,但是温度较低的日数比较集中,冬季容易造成低温冻害。

3.2 极端降水时空变化特征

3.2.1 极端降水指数年际变化 从图 5 可以看出,1960—2017 年呼伦贝尔草原极端降水的年际变化趋势和变化速率。从线性拟合结果来看,表征平均降水强度的 SDII 基本处于稳定状态,1960—2017 年呈现轻微的下降趋势;表征年降水量的 PRCPTOT 呈现下降趋势,速率为 3.7 mm·(10a)$^{-1}$,但并不显著;持续干燥指数(CDD)以 0.2 d·(10a)$^{-1}$呈现上升趋势;5 d 最大降水量(RX5D)、持续湿润指数(CWD)分别以 5 mm·(10a)$^{-1}$和 0.2 d·(10a)$^{-1}$的速率下降($P<0.01$)。M-K 趋势检验结果(表 3)与线性分析结果基本一致,CWD 和 RX5D 均通过了 0.01 的显著性检验;而 SDII、PRCPTOT、CDD 变化趋势不明显。从表 2 中可以看出, SDII、CCD、RX5D、PRCPTOT 和 CWD 5 项指标并无明显的公共突变点部分。综合来看,研究区无论是在降水强度、降水持续时间、降水总量方面都呈现出下降的趋势,且呈缓慢变干的趋势。

3.2.2 极端降水指数的周期变化 对极端降水指数中的年湿润期降水总量(PRCPTOT)、持续干燥指数(CDD)进行小波变换(图 6)。从结果中可以看出年湿润期降水总量存在 2 ~ 4 a 的振荡周期且通过显著性水平检验,此外还存在 7 a 的周期,但未通过显著性检验。持续干燥指数存在 1 ~ 4 a 的振荡周期通过显著性水平检验。从周期出现的时间来看,20 世纪 90 年代以前,PRCPTOT 出现了 16 a 左右的周期,20 世纪 90 年代以后以 4 ~ 8 a 周期为主;CDD 在 20 世纪 70 年代以后出现了 8 ~ 16 a 的周期。

3.2.3 极端降水空间变化 由图 7 可知,表征极端降水事件的各种指数具有明显的空间特征。在南北方向上以研究区的中轴线为界,SDII 在空间上呈现出由西向东减少速率增加,东部降水强度下降更为明显;从 PRCPTOT 来看,整个研究区的降水变化东部和北部为正值,呈现增加趋势,西部降水总量减小较为明显,整个研究区降水强度减少的情况下,研究区中部和东北部的 PRCPTOT 增加,有可能是因为中部和东部降水日数增加所致;CDD 的空间分布在中心轴线以东呈现减少趋势,在中心轴线以西呈现增加趋势,西北部地区有变干的趋势;就 CWD 的空间分布来看,全区域内 CWD 均呈现下降趋势,中部

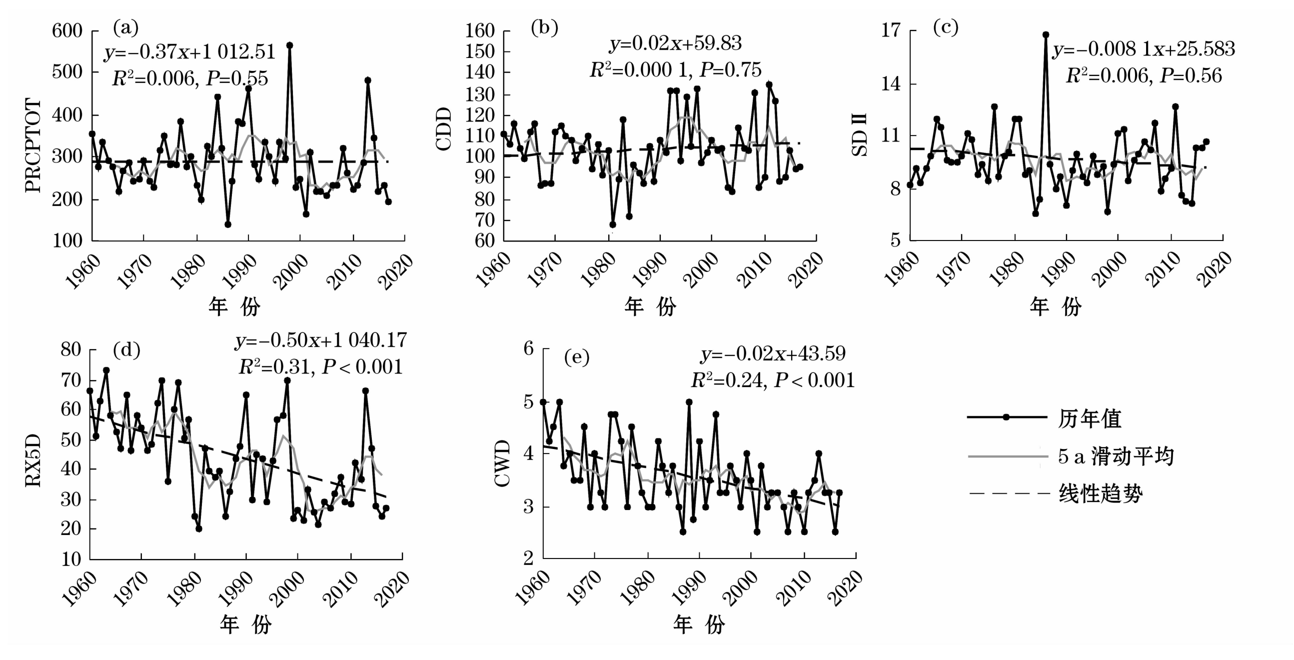
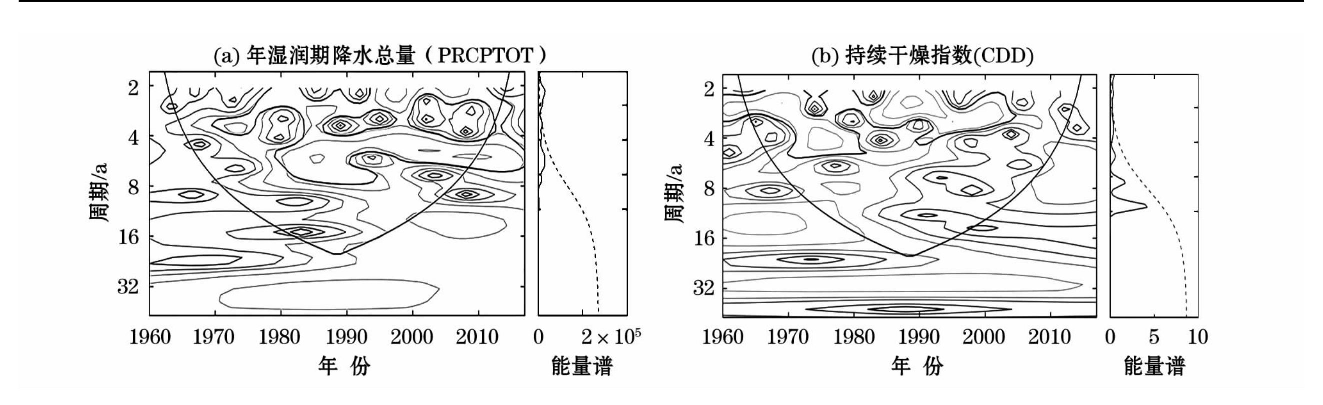


图 5 1960—2017 年呼伦贝尔草原极端降水指数的年际变化

Fig. 5 Annual variation of extreme precipitation indices in the Hulunbuir Grasslands during the period from 1960 to 2017



注:黑实线圆弧表示头部影响的临界线,黑曲线内的区域表示通过了0.05显著性水平的检验,能量谱中实线为能量谱,超过虚线的部分通过了0.05显著性水平的检验。

图6 年总降水量(PRCPTOT)和持续干燥指数(CDD)小波功率谱及小波全域能量谱

Fig.6 Continuous Morlet wavelet power and the global wavelet power spectra of PRCPTOT and CDD

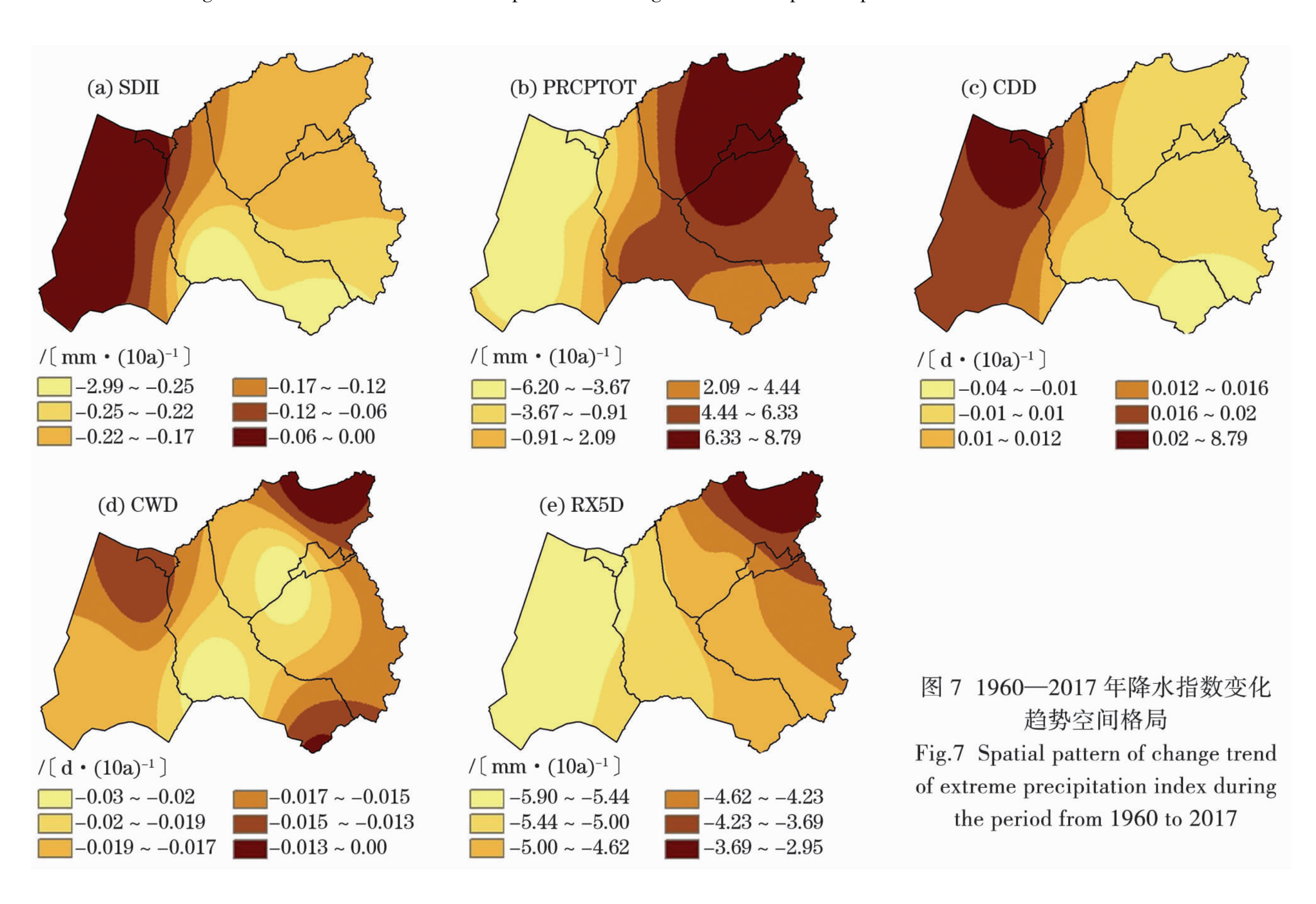


图7 1960—2017年降水指数变化趋势空间格局

Fig.7 Spatial pattern of change trend of extreme precipitation index during the period from 1960 to 2017

和南部地区下降较为明显;RX5D全区域内均呈现显著下降趋势,由东到西年湿润期降水总量减少逐渐明显。综合以上空间分布可以看出,呼伦贝尔草原降雨量以中轴线为界,东西部地区空间差异明显,尽管中轴线以东地区降水强度减少速率快,但是其干燥指数下降,连续5 d降水强度减少缓慢,年降水总量以4.45~8.79 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈增加趋势,有变湿的趋势;中轴线以西地区,尽管降水强度减少缓慢,但是其年降水量以0.9~6.2 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈减少趋势,CDD增加,CWD减少,连续5 d降水强度也减少较快,西部研究区呈现出变干的趋势。

4 讨论和结论

4.1 讨论

本文通过M-K趋势分析和线性拟合的方法,分析近58 a呼伦贝尔草原极端气候的变化趋势。一方面,从呼伦贝尔表征极端高温事件的指标来看,SU25、TN90P、TX90P、WSDI呈现显著上升趋势,FD0

和 TN10P 呈现显著下降趋势,这与赵国永等[20]和刘俊英等[21]在内蒙古的研究结果相一致,说明呼伦贝尔草原是对全球气候变暖的正反应区;本研究中通过 M-K 突变点检验得出,SU25、TN90P、TX90P、WSDI 突变年份多集中于20 世纪90 年代初,这与闫慧敏等[22]研究得到的内蒙古极端高温事件急剧增加的时间相一致。另一方面,就研究区极端降水的变化趋势而言,近 58 a 研究区年湿润期降水总量呈现下降趋势,但是并不显著,这与邸择雷等[23]对新巴尔虎右旗单一站点的研究结果相一致。研究区中轴线以东年湿润期降水总量 PRCPTOT 呈微弱的上升趋势,但是 SDII 呈轻微的下降趋势,说明区域降水总量有微弱增加,但增加的降水量并非由降水强度的增加所致,而是受降水持续时间加长的影响,这与高妍等[11]在祁连山的研究结果有一定的相似之处。

在中国大部分地区,降水呈现出显著的季节变化降水频次和降水量集中在一年中的一些特定时段,极端降水也存在明显的季节性[24]。杨素英等[25]对东北地区 1959—2002 年极端降水事件进行了研究,认为 6—9 月是极端降水事件集中出现月份;本研究以年为尺度分析极端气候在 58 a 内的变化情况,未考虑季节尺度上的差异性。同时,由于研究区内的气象站点比较少,单独对某个站点极端气候进行变化趋势和显著性分析并不能全部代表整个研究区的变化趋势情况,所以本文参考汪宝龙等[26]、栗忠魁等[3]在西北和华北地区的研究方法,对 6 个站点的 Sen's 斜率进行差值,进而得到整个研究区内极端气候指标的变化情况。

极端气候的加剧可能会对呼伦贝尔地区 NPP 产生重要影响。气候条件在净初级生产力的形成中起着决定作用,水热条件在时间和空间上的分布不均是引起植被及其生产力变化的重要自然因素[27]。李永华等[28]对重庆的研究得到,NPP 的变化趋势与降水接近,重庆地区"暖湿型"气候对 NPP 增加最有利,而"冷干型"气候对 NPP 增加最不利;陈玲[29]对民勤梭梭的研究得出随着气温升高或降低,梭梭物候期持续日数缩短或延长;随着降水的增多,梭梭物候期持续日数延长。张戈丽等[30]对呼伦贝尔地区草地的研究得出降水是驱动草地植被年际变化的主要因素,春季草地植物生长对气温变化的敏感性较降水变化高,夏季和秋季草地植被的生长对降水变化的敏感性则高于对气温变化的敏感性,植被与气候要素月变化的关系可以具体地揭示气温和降水对草地植被生长的季节韵律控制。综合来说极端高温和降水会引起干旱等自然灾害,进而导致 NPP 减少,农牧业减产。

4.2 结论

(1) 呼伦贝尔草原存在明显的变暖趋势。呼伦贝尔草原表征极端高温事件的 4 种指数(SU25、TN90P、TX90P、WSDI)呈现显著上升趋势;表征极端低温事件的 FD0 和 TN10P 呈现显著下降趋势。此外,研究区内表征极端高温的指数增加速率高于极端低温指数。呼伦贝尔草原是对全球气候变暖的正反应区域。

(2) 极端气温指数具有一定的空间分布特征和周期性。在空间分布方面,整个研究区的极端高温指数呈现出全区域的上升趋势,TX90、SU25、WSDI、TN90P 增加幅度较高以及上升趋势较明显的地区均集中于研究区的东北部;极端低温指数(TX10P、FD0)在空间上呈现从西南至东北方向上由减少变为增多。表征高温的指数(SU25、TN90P、TX90P、WSDI)突变年份多集中于 20 世纪 90 年代初,气温指数的显著周期多集中于 2 ~9 a。

(3) 研究区降水呈现减少的趋势。5 d 最大降水量(RX5D)、持续湿润指数(CWD)呈现出显著下降趋势;表征降水强度的 SDII,1960—2017 年呈现轻微的下降趋势,基本处于稳定状态;持续干燥指数(CDD)呈现上升趋势;表征年总降水量的 PRCPTOT 呈现下降趋势但并不显著。降水指数并未发现统一的突变点分布区间,小波显著性周期集中在 2 ~7 a。

(4) 表征极端降水事件的各种指数(SDII、PRCPTOT、CDD、RX5D)在南北方向上大致以研究区中部为界,两侧降水及湿润程度变化速率存在明显的差异性。全区域中 CWD 呈现显著下降趋势($P<0.05$);东部地区 CDD 下降,年总降水量显著上升,具有变湿润的趋势;西部地区 CDD 增加,CWD 减少($P<0.05$),呈现出变干的趋势。

参考文献(References):

〔1〕 张存杰,黄大鹏,刘昌义,等. IPCC 第五次评估报告气候变化对人类福祉影响的新认知〔J〕. 气候变化研究进展,2014,10(4):246 - 250.〔Zhang Cunjie, Huang Dapeng, Liu Changyi, et al. IPCC AR5 updated understanding of climate change impacts on human well-beings〔J〕. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2014,10(4):246 - 250.〕

〔2〕 IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis〔M〕. Ca-

mbridge:Cambridge University Press,2014.
〔3〕 栗忠魁,胡卓玮,魏铼,等. 1951—2013 年华北地区极端降水事件的变化〔J〕. 遥感技术与应用,2016,31(4):773 – 783.〔Li Zhongkui,Hu Zhuowei,Wei Lai,et al. Change in extreme precipitation events over Northern China from 1951 – 2013〔J〕. Remote Sense in Technology and Application,2016,31(4):773 – 783.〕
〔4〕 王怀军,潘莹萍,陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征〔J〕. 地理科学,2017,37(12):1 900 – 1 908.〔Wang Huaijun,Pan Yingping,Chen Zhongsheng. Spatial and temporal patterns of temperature and precipitation extremes in the Huaihe River Basin,China in 1960 – 2014〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2017,37(12):1 900 – 1 908.〕
〔5〕 李洋,王玉辉,吕晓敏,等. 1961—2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化〔J〕. 资源科学,2015,37(12):2 501 – 2 513.〔Li Yang,Wang Yuhui,Lv Xiaomin,et al. Spatial distribution and temporal change in extreme weather events in three provinces in Northeast China〔J〕. Resources Science,2015,37(12):2 501 – 2 513.〕
〔6〕 Song X,Zhang Z,Chen Y,et al. Spatiotemporal changes of global extreme temperature events (ETEs) since 1981 and the meteorological causes〔J〕. Natural Hazards,2014,70(2):975 – 994.
〔7〕 任国玉,封国林,严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望〔J〕. 气候与环境研究,2010,15(4):337 – 353.〔Ren Guoyu,Feng Guolin,Yan Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China〔J〕. Climatic and Environmental Research,2010,15(4):337 – 353.〕
〔8〕 郑景云,郝志新,方修琦,等. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征〔J〕. 地理科学进展,2014,33(1):3 – 12.〔Zheng Jingyun,Hao Zhixin,Fang Xiuqi,et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China〔J〕. Progress in Geography,2014,33(1):3 – 12.〕
〔9〕 任景全,郭春明,刘玉汐,等. 1961—2015 年吉林省极端气温指数时空变化特征〔J〕. 生态学杂志,2017,36(11):3 224 – 3 234.〔Ren Jingquan,Guo Chunming,Liu Yuxi,et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme temperature indices in Jilin Province during 1961 – 2015〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3 224 – 3 234.〕
〔10〕 游庆龙,康世昌,闫宇平,等. 近 45 年雅鲁藏布江流域极端气候事件趋势分析〔J〕. 地理学报,2009,64(5):592 – 600.〔You Qinglong,Kang Shichang,Yan Yuping,et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over the Yarlung Zangbo River Basin during 1961 – 2005〔J〕. Acta Geographica Sinica,2009,64(5):592 – 600.〕
〔11〕 高妍,冯起,李宗省,等. 祁连山讨赖河流域 1957—2012 年极端气候变化〔J〕. 中国沙漠,2014,34(3):814 – 826.〔Gao Yan,Feng Qi,Li Zhongxing,et al. The variation of climate extremes in the Taolaihe River Basin in the Qilian Mountains of China during 1957 – 2012〔J〕. Journal of Desert Research,2014,34(3):814 – 826.〕
〔12〕 吕婷,武胜利,刘强吉,等. 1952—2013 年吐鲁番市极端气温变化规律研究〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):606 – 614.〔Lv Ting,Wu Shengli,Liu Qiangji,et al. Variations of extreme temperature in Turpan City,Xinjiang during the period of 1952 – 2013〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):606 – 614.〕
〔13〕 王希平,赵慧颖. 内蒙古呼伦贝尔市林牧农业气候资源与区划〔M〕. 北京:气象出版社,2006:9 – 12.〔Wang Xiping,Zhao Huiying. Inner Mongolia Hulunbeier City Forestry Animal Husbandry Agricultural Climate Resources and Regional Planning〔M〕. Beijing:Meteorological Press,2006:9 – 12.〕
〔14〕 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强〔J〕. 中国科学:C 辑,2003,33(6):554 – 565.〔Fang Jingyun,Piao Shilong,He Jinsheng,et al. Vegetation of China invigorated in last 20 years〔J〕. Scientia Sinica(Vitae),2003,33(6):554 – 565.〕
〔15〕 马玉玲,余卫红,方修琦. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应〔J〕. 干旱区地理,2004,27(1):29 – 34.〔Ma Yuling,Yu Weihong,Fang Xiuqi. Change of grass growth in the Hulun Buir steppe in response to global warming〔J〕. Arid Land Geography,2004,27(1):29 – 34.〕
〔16〕 李云鹏,娜日苏,刘朋涛,等. 呼伦贝尔草原退化遥感监测与气候成因〔J〕. 华北农学报,2006,21(增刊 3):56 – 61.〔Li Yunpeng,Na Risu,Li Pengtao,et al. Remote sensing monitoring of grassland degradation and climate causes in HulunBuir Grassland〔J〕. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2006,21(Suppl. 3):56 – 61.〕
〔17〕 马齐云,张继权,来全,等. 1960—2014 年松嫩草地极端气候事件的时空变化〔J〕. 应用生态学报,2017,28(6):1 769 – 1 778.〔Ma Qiyun,Zhang Jiquan,Lai Quan,et al. Temporal and spatial variations of extreme climatic events in Songnen Grassland,Northeast China during 1960 – 2014〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(6):1 769 – 1 778.〕
〔18〕 Kiktev D,Sexton D M H,Alexander L,et al. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes〔J〕. Journal of Climate,2003,16(22): 3 560 – 3 571.
〔19〕 郑爱勤,王文科,段磊,等. 渭河流域基流及降雨的多尺度特征和突变分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2012,26(6):144 – 148.〔Zheng Aiqin,Wang Wenke,Duan Lei,et al. Multiscale characteristics and abrupt change of base flow and precipitation series of Wei River〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(6):144 – 148.〕
〔20〕 赵国永,韩艳,刘明华,等. 1951—2014 年内蒙古自治区极端气温事件时空变化特征〔J〕. 干旱区资源与环境,2017,31(12):110 – 116.〔Zhao Guoyong,Han Yan,Liu Minghua,et al. Characteristics of temporal and spatial variations of extreme temperature events in Inner Mongolia during 1951 – 2014〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(12):110 – 116.〕
〔21〕 刘俊英,刘华民,王炜,等. 内蒙古地区近 40 年极端天气气候事件变化研究〔J〕. 内蒙古大学学报(自然科学版),2015,46(4):400 – 408.〔Liu Junying,Liu Huamin,Wang Wei,et al. Study of extreme daily temperature and precipitation in rencent fourth years in Inner Mongolia〔J〕. Journal of Mongoliana University (Natural Science Edition),2015,46(4):400 – 408.〕
〔22〕 闫慧敏,陈伟娜,杨方兴,等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征〔J〕. 地理研究,2014,33(1):13 – 22.〔Yan Huimin,Chen Weina,Yang Fangxing,et al. The spatial and temporal analysis of extreme climatic events in Inner Mongolia during the past 50 years〔J〕. Geographical Research,2014,33(1):13 – 22.〕
〔23〕 邸泽雷,乌云娜,宋彦涛,等. 1958—2016 年呼伦贝尔草原新巴尔虎右旗气温和降水变化特征〔J〕. 中国沙漠,2017,37(5):1 006 – 1 015.〔Di Zelei,Wu Yunna,Song Yantao. et al. Variation of temperature and precipitation in the Xin Barag Right Banner of the Hulunbuir Grassland during 1958 – 2016〔J〕. Journal of Desert

Research,2017,37(5):1 006 - 1 015.]

〔24〕李建,宇如聪,孙溦. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征〔J〕. 气象学报,2013,71(4):652 - 659.〔Li Jian,Yu Rucong,Sun Wei. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2013,71(4):652 - 659.〕

〔25〕杨素英,孙凤华,马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征〔J〕. 地理科学,2008,28(2):224 - 228.〔Yang Suying,Sun Fenghua,Ma Jianzhong. Evolvement of precipitation extremes in Northeast China on the background of climate warming〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2008,28(2):224 - 228.〕

〔26〕汪宝龙,张明军,魏军林,等. 西北地区近 50 a 气温和降水极端事件的变化特征〔J〕. 自然资源学报,2012,27(10):1 720 - 1 733.〔Wang Baolong,Zhang Mingjun,Wei Junlin,et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over Northwest China in recent 50 years〔J〕. Journal of Natural Resources,2012,27(10):1 720 - 1 733.〕

〔27〕韩艳. 气候波动对呼伦贝尔森林草原交错带生产力格局的影响〔D〕. 烟台:鲁东大学,2012.〔Han Yan. Influence of Climate Fluctuation on the Productivity Pattern in the Ecotone Between Hulunbeier and Inner Mongolia〔D〕. Yantai:Ludong University,2012.〕

〔28〕李永华. 重庆地区年气温与降水变化特征及其对 NPP 的影响〔C〕//中国气象学会,湖南省气象学会. 全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集. 2006:8.〔Li Yonghua. Characteristics of annual temperature and precipitation change in Chongqing and its impact on NPP〔C〕//Proceedings of the Chinese Society of Meteorology and the Hunan Meteorological Society. The Seventh National Outstanding Young Meteorological Science and Technology Workers Academic Symposium Collection,2006:8.〕

〔29〕陈玲. 民勤近年气温和降水对梭梭物候期的影响〔J〕. 农业与技术,2017,37(18):228 - 229.〔Chen Ling. Effects of temperature and precipitation in recent years on phenophase of *Haloxylon ammodendron*〔J〕. Agriculture and Technology,2017,37(18):228 - 229.〕

〔30〕张戈丽,徐兴良,周才平,等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应〔J〕. 地理学报,2011,66(1):47 - 58.〔Zhang Geli,Xu Xingliang,Zhou Caiping,et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in HulunBuir Grassland in past 30 years〔J〕. Acta Geographica Sinica,2011,66(1):47 - 58.〕

Spatiotemporal Variation of Extreme Climatic Events in the Hulunbuir Grasslands during the Period of 1960 – 2017

CUI Feng-qi[1,2], TANG Hai-ping[1,2], ZHANG Qin[1,2], DAI Lu-wei[1,2]

(1. *Faculty of Geographical Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100857, *China*;
2. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*)

Abstract: Thirteen extreme climatic indices related with regional meteorological disasters and vegetation growth were calculated based on the daily meteorological data from 6 meteorological stations in the Hulunbuir Grasslands and its surrounding area during the period of 1960 – 2017. The linear trend method, Mann-Kendall test, Sen's slope estimator and wavelet analysis were used. The results showed that the summer days (SU25), warm nights (TN90P), warm days (TX90P) and continuous warm days (CWD) used to characterize the extreme high temperature increased significantly ($P < 0.01$) with the rates of 3.53 d·$(10a)^{-1}$, 4.09 d·$(10a)^{-1}$, 3.1 d·$(10a)^{-1}$ and 2.67 d·$(10a)^{-1}$ respectively. The exponential frost days (FD0) and cold nights (TN10P) used to characterize the extreme cold events decreased significantly with the rates of 3.22 d·$(10a)^{-1}$ and 2.9 d·$(10a)^{-1}$ respectively ($P < 0.05$). The abrupt change of extreme temperature began from the 1990s. The region with the highest warming rate was located in the northeastern part of the study area. The significant period of extreme high temperature index was concentrated on the scale of 2 – 9 years. The maximum 5 day precipitation (RX5D) and consecutive wet index (CWD) in the study area were in a significantly decrease trend ($P < 0.01$) with rates of 5 mm·$(10a)^{-1}$ and 0.2 d·$(10a)^{-1}$ respectively. The consecutive dry index (CDD) was in a slight increase, and the annual wet day precipitation (PRCPTOT) and precipitation intensity were in a slight decrease trend. The indices used to characterize the extreme precipitation events (common daily intensity index, wet day precipitation , consecutive dry index and maximum 5 day precipitation) were delimited along the central axis of the study area in a north-south direction. The drying index in the eastern region was in a decrease trend. Annual precipitation increased significantly. In the western region, the consecutive dryness index (CDD) increased, and the consecutive wetness index (CWD) decreased significantly.

Key words: extreme climate; extreme precipitation; spatiotemporal variation; Mann-Kendall test; Wavelet analysis; Hulunbuir grasslands